

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

In re application of: **Hiroji EBE, et al.**

Group Art Unit: **Not Yet Assigned**

Serial No.: **Not Yet Assigned**

Examiner: **Not Yet Assigned**

Filed: **September 16, 2003**

For: **QUANTUM OPTICAL SEMICONDUCTOR DEVICE**

CLAIM FOR PRIORITY UNDER 35 U.S.C. 119

Commissioner for Patents
P.O. Box 1450
Alexandria, VA 22313-1450

Date: September 16, 2003

Sir:

The benefit of the filing date of the following prior foreign application is hereby requested for the above-identified application, and the priority provided in 35 U.S.C. 119 is hereby claimed:

Japanese Appln. No. 2002-273178, filed September 19, 2002

In support of this claim, the requisite certified copy of said original foreign application is filed herewith.

It is requested that the file of this application be marked to indicate that the applicants have complied with the requirements of 35 U.S.C. 119 and that the Patent and Trademark Office kindly acknowledge receipt of said certified copy.

In the event that any fees are due in connection with this paper, please charge our Deposit Account No. 01-2340.

Respectfully submitted,

ARMSTRONG, WESTERMAN & HATTORI, LLP



Donald W. Hanson
Attorney for Applicants
Reg. No. 27,133

DWH/jaz
Atty. Docket No. **031171**
Suite 1000
1725 K Street, N.W.
Washington, D.C. 20006
(202) 659-2930



23850

PATENT TRADEMARK OFFICE

PATENT OFFICE
JAPANESE GOVERNMENT

This is to certify that the annexed is a true copy
of the following application as filed with this office.

Date of Application: September 19, 2002

Application Number: No. 2002-273178
[ST.10/C]: [JP 2002-273178]

Applicant(s) : FUJITSU LIMITED

January 31, 2003

Certificate No. 2003-3003336

日本特許庁
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office

出願年月日

Date of Application:

2002年 9月19日

出願番号

Application Number:

特願2002-273178

[ST.10/C]:

[JP2002-273178]

出願人

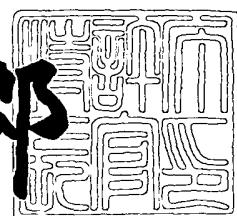
Applicant(s):

富士通株式会社

2003年 1月31日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

太田信一郎



出証番号 出証特2003-3003336

【書類名】 特許願

【整理番号】 0240967

【提出日】 平成14年 9月19日

【あて先】 特許庁長官 太田 信一郎 殿

【国際特許分類】 H01L 33/00
H01L 29/06
H01L 29/68

【発明の名称】 量子光半導体装置

【請求項の数】 10

【発明者】

【住所又は居所】 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通
株式会社内

【氏名】 江部 広治

【発明者】

【住所又は居所】 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通
株式会社内

【氏名】 中田 義昭

【発明者】

【住所又は居所】 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通
株式会社内

【氏名】 菅原 充

【発明者】

【住所又は居所】 大阪府門真市常称寺町20-14

【氏名】 喜多 隆

【発明者】

【住所又は居所】 兵庫県神戸市東灘区御影山手2-3-22-309

【氏名】 和田 修

【発明者】

【住所又は居所】 神奈川県川崎市麻生区王禅寺東1-31-6

【氏名】 荒川 泰彦

【特許出願人】

【識別番号】 000005223

【氏名又は名称】 富士通株式会社

【代理人】

【識別番号】 100070150

【住所又は居所】 東京都渋谷区恵比寿4丁目20番3号 恵比寿ガーデン
プレイスタワー32階

【弁理士】

【氏名又は名称】 伊東 忠彦

【電話番号】 03-5424-2511

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 002989

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 0114942

【ブルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 量子光半導体装置

【特許請求の範囲】

【請求項1】 半導体基板と、前記半導体基板上に形成された、量子構造を含む活性層とよりなる量子光半導体装置において、

前記量子構造は：

第1の格子定数および第1のバンドギャップを有する第1の半導体結晶よりなる第1のバリア層と、

前記第1のバリア層上にエピタキシャルに形成され、第2の格子定数および第2のバンドギャップを有する第2の半導体結晶よりなる第2のバリア層と、

前記第2のバリア層中に形成され、前記第1の格子定数とは異なる格子定数および前記第1および第2のバンドギャップよりも小さなバンドギャップを有し、前記第1の半導体結晶および第2の半導体結晶に対して歪み系を形成する半導体結晶よりなり、各々前記第2のバリア層の厚さに実質的に等しい高さを有する複数の量子ドットと、

前記第2のバリア層上に形成され、前記量子ドットを形成する半導体結晶の格子定数とは異なる格子定数を有し、また前記量子ドットを形成する半導体結晶のバンドギャップよりも大きな第3のバンドギャップを有する第3の半導体結晶よりなる第3のバリア層とよりなり、

前記第3のバリア層は、前記第2のバリア層中に形成された前記量子ドットの頂部に接することを特徴とする量子光半導体装置。

【請求項2】 前記第1のバリア層は、前記量子ドット近傍の領域において変化した組成を有し、前記第3のバリア層は、前記量子ドット近傍の領域において変化した組成を有することを特徴とする請求項1記載の量子光半導体装置。

【請求項3】 前記第1～第3のバリア層はInおよびGaを含むIII-V族化合物半導体混晶であり、前記第1および第3のバリア層では、前記量子ドット近傍の領域においてIn濃度が増大していることを特徴とする請求項2記載の量子光半導体装置。

【請求項4】 前記第2のバリア層は、前記量子ドット近傍の領域において

Ga濃度が増大していることを特徴とする請求項3記載の量子半導体装置。

【請求項5】 前記第1の半導体結晶、前記第2の半導体結晶および前記第3の半導体結晶は、前記半導体基板に対して格子整合するものであることを特徴とする請求項1～4のうち、いずれか一項記載の量子光半導体装置。

【請求項6】 半導体基板と、前記半導体基板上に形成された、量子構造を含む活性層とよりなる量子光半導体装置において、

前記量子構造は：

第1の格子定数および第1のバンドギャップを有する第1の半導体結晶よりなる第1のバリア層と、

前記第1のバリア層上にエピタキシャルに形成され、第2の格子定数および第2のバンドギャップを有する第2の半導体結晶よりなる第2のバリア層と、

前記第2のバリア層中に形成され、前記第1の格子定数とは異なる格子定数および前記第1および第2のバンドギャップよりも小さなバンドギャップを有し、前記第1の半導体結晶および第2の半導体結晶に対して歪み系を形成する半導体結晶よりなり、各々前記第1のバリア層の厚さに実質的に等しい高さを有する複数の量子ドットとよりなり、

前記第1のバリア層と前記第2のバリア層とは、前記第1のバリア層が前記第2のバリア層中の前記量子ドットの頂部に接するように繰り返し積層され、

前記第1のバリア層と前記第2のバリア層とは、異なった組成を有することを特徴とする量子光半導体装置。

【請求項7】 前記量子ドットはInAsよりなり、前記第1および第2のバリア層は、いずれもInGaAsP混晶よりなることを特徴とする請求項6記載の量子光半導体装置。

【請求項8】 前記第2のバリア層は、組成パラメータxおよびyを使って $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ で表される組成を有し、組成パラメータxが0.65以下に設定されることを特徴とする請求項7記載の量子光半導体装置。

【請求項9】 前記量子構造は、TMモードの光放射に対する相互作用の割合が、TEモードの光放射に対する相互作用の割合と等しいか、より大きいことを特徴とする請求項1～8のうち、いずれか一項記載の量子光半導体装置。

【請求項10】 半導体基板と、前記半導体基板上に形成された、量子構造を含む活性層とよりなる量子光半導体装置において、

前記量子構造は：

第1の格子定数および第1のバンドギャップを有する第1の半導体結晶よりなるバリア層と、

前記バリア層中に形成され、前記第1の格子定数とは異なる第2の格子定数および前記第1のバンドギャップよりも小さな第2のバンドギャップを有し、前記第1の半導体結晶に対して歪み系を形成する半導体結晶よりなる複数の量子ドットとよりなり、

前記複数の量子ドットを含む前記バリア層は所定の積層数だけ積層され、

前記積層数は、TMモードの光放射に対する相互作用の割合が、TEモードの光放射に対する相互作用の割合と等しいか、より大きくなるように設定されていることを特徴とする量子光半導体装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は一般に半導体装置に係り、特に量子ドット構造を有する量子半導体装置に関する。

【0002】

キャリアの閉じ込めのない、いわゆるバルク半導体結晶では、キャリアの状態密度はエネルギーと共に放物線的に、すなわち連続的に増大するが、半導体結晶中にキャリアを1次元的に閉じ込めたいわゆる量子井戸構造では量子準位が出現するため、状態密度が階段状に変化する。かかる階段状の状態密度を有する系では、キャリアの分布はバルク結晶の場合よりも制限されるため、かかる量子井戸構造を例えばレーザダイオード等の光半導体装置に適用した場合、バルク半導体結晶を使った場合よりも幅のせまい鋭いスペクトルが得られ、またレーザダイオード等の発光素子では発光効率が向上する。また、量子井戸構造は、RHETのような共鳴バリアを有する電子素子において、キャリアのエネルギーフィルタとして使われている。

【0003】

かかるキャリアの閉じ込めをさらに進めた量子細線構造では、キャリアの2次元的な閉じ込めの結果、状態密度は各階段の下端で最大になるように変化するため、キャリアのエネルギースペクトルはさらに鋭くなる。

【0004】

キャリアの閉じ込めをさらに進めた究極的な量子ドット構造では、キャリアの3次元的な閉じ込めの結果、状態密度は離散的になり、これに伴い、キャリアのエネルギースペクトルは、各量子準位に対応して完全に離散的になる。かかる離散的なエネルギースペクトルを有する系では、系が室温等の熱的励起が存在するような状態にあってもキャリアの遷移が量子準位間で不連続に生じるため、例えば量子ドット構造を有する光半導体装置では、室温においても非常に鋭い発光スペクトルを得ることができる。また、かかる量子ドット構造をRHETのような共鳴バリアを有する電子素子において、キャリアのエネルギーフィルタとして使った場合も、低温のみならず、室温においても非常に鋭いエネルギースペクトルが得られる。

【0005】

また、かかる量子ドット構造は、エネルギー緩和のボトルネック問題等、基礎物理学的な興味も持たれている。

【0006】

【従来の技術】

従来、量子井戸構造は、MBE法あるいはMOVPE法を使って一対のバリア層の間に非常に薄い量子井戸層を介在させることにより、比較的容易に、また確実に形成することが可能であった。また、量子細線構造については、階段構造を有するいわゆる傾斜半導体基板を使い、各階段の側縁に沿って厚さおよび幅の狭い半導体層を量子井戸層として成長させる方法、あるいは1次元量子井戸構造を電子ビームリソグラフィ等により形成する方法が提案されている。

【0007】

そこで、量子ドット構造についても、このような傾斜基板上の段差あるいはシンクを使って形成することが考えられるが、かかる基板表面の段差の制御は困難

であり、またかかる量子ドット界面においては元素の混合が生じやすく、界面における組成の急峻な変化が困難である等の問題点が存在する。また、リソグラフィ等のパターニングを使った場合、加工に伴う量子ドットへの実質的な損傷が避けられない。

【0008】

これに対し、InAs/GaAs等の歪み系ヘテロエピタキシャル構造において、ヘテロエピタキシャル成長の初期に出現するいわゆるS-K (Stranski-Krastanow) モード成長を利用することにより、基板上に相互に離間した島の形で量子ドット構造を形成することができる事が知られている。例えば、GaAs基板上に、In組成が0.5程度の格子定数が大きく異なるInGaAs層を数分子層、MBE法により堆積することにより、直径が30~40nmのInGaAsの島がGaAs基板上に形成されることが報告されている。例えば非特許文献1を参照。また、ALE法を使って直径が15~20nm程度のInGaAsの島を、GaAs基板上に、100nm程度の間隔で形成できることが報告されている。例えば非特許文献2を参照。さらに、MOVPE法によっても、同様な量子ドットを形成できることが知られている。例えば非特許文献3を参照。

【0009】

かかる歪み系ヘテロエピタキシャル構造における量子ドットの形成は、ヘテロ界面に生じる歪みエネルギーに支配されるため、従来の量子ドット構造の形成に比べてはるかに簡単であり、また電子ビームリソグラフィ等によるパターニングを行なうわけでもないので、形成された量子ドットが製造プロセスにより損傷を受けることもない。

【0010】

S-Kモードにより形成される量子ドットはこのように格子不整合材料系を使って形成されるため、一般に非等方な歪を有し、面内方向に圧縮歪が、また成長方向に引っ張り歪または面内方向よりも弱い圧縮歪が生じる。

【0011】

図1は、特開平9-326506号公報に記載のS-Kモードで成長した量子ドットを有する量子半導体装置の構成を示す。特許文献1を参照。

【0012】

図1を参照するに、(100)面方位を有するGaAs基板1上にはGaAsバッファ層2を介して多数のInAs量子ドット3bがS-Kモード成長により形成されている。これらの量子ドット3bは多層構造を形成しており、各々の層においてInAs量子ドット3bはGaAs中間層ないしバリア層3a中に埋め込まれている。また、次の層の量子ドット3bが、かかるInAs量子ドット3bを埋め込むバリア層3a上に成長している。

【0013】

図1の例では個々の量子ドット3bが、それを覆うバリア層3a中、特に量子ドット3bの頂部に接する部分に強い歪みを誘起し、その結果、バリア層3a上に形成される量子ドット3bは下側の量子ドット3bの直上に成長しやすい。その結果、前記バリア層3aおよび量子ドット3bを繰り返し形成した場合、量子ドット3bが基板に垂直な方向に整列した構造が得られる。

【0014】

【非特許文献1】

Leonard, D., et al., Appl. Phys. Lett. 63, pp.3203 - 3205, 1993

【非特許文献2】

Mukai, K., et al., Jpn. J. Appl. Phys., 33, pp.L1710 - L1712, 1994

【非特許文献3】

Oshinowo, J., et al., Appl. Phys. Lett. 65, (11), pp.1421 - 1423 (1994)

【特許文献1】

特開平9-326506号公報

【0015】

【発明が解決しようとする課題】

ところで、このようなS-Kモード成長した量子ドットを有する量子半導体装置を使ってレーザダイオード、光増幅器、光スイッチ、波長変換素子など全光ネットワークあるいはフォトニックネットワークを構成する素子を形成しようとした場合、光ファイバ中を伝播する光信号が偏波無依存性を有しているため、これ

らの素子も偏波無依存性を有することが要求される。

【0016】

ところが、先にも説明したように、S-Kモード成長を利用した量子ドットでは、形状が一般に扁平で、しかも歪が等方的でないため、TEモードの光のみを增幅あるいは発信する素子しか作製することができず、実際のシステムで要求される無偏波動作を実現するのが困難である。

【0017】

より具体的に説明すると、量子ドットに非等方的な歪が加わると、価電子帯を形成する正孔準位が図2に示すように重い正孔準位と軽い正孔準位とに分離し、間に

$$\Delta E_{1-h} = -2b (\epsilon_{zz} - \epsilon_{xx}) \quad (1)$$

であらわされるエネルギー差が出現する。ただし b は負の定数で一軸性変形ポテンシャルと呼ばれる量、 ϵ_{xx} および ϵ_{zz} は、それぞれ面内方向および面に垂直方向の歪成分を現し、引っ張り歪の場合に正の値を、圧縮歪の場合に負の値をとるよう定義している。

【0018】

そこで、従来の量子ドットのように、面内方向に圧縮歪がかかった系では前記 ΔE_{1-h} の値が正になり、電子-重い正孔間のエネルギー準位差が、電子-軽い正孔間のエネルギー準位差よりも小さくなる。その結果、かかる量子ドットでは、光遷移は図2に示すように重い正孔のエネルギー準位と伝導帯を形成する電子エネルギー準位との間で生じるようになる。

【0019】

ところで、このような量子ドットの光学的遷移は、入射光の電場成分が量子ドット中における電子波の波動ベクトル k に垂直な方向である場合にしか生じない。S-Kモード成長した扁平な量子ドットでは、電子の量子化が特に基板面に対して垂直な方向の成分について顕著に生じるため、電子波の波動ベクトル k は基板面に垂直になり、従ってこのようなS-Kモード成長した量子ドットでは、入射光が、電場成分が基板面と平行なTEモードのものである場合にしか生じない。従って、このような従来のS-Kモード成長した量子ドットを使った半導体装

置では顕著な偏波依存性が現れる。このような従来の光半導体装置を使って偏波無依存性が要求されるフォトニックネットワークを構築するのは、偏波整合のための光学系を使わない限り、困難である。しかし、このような光学系は複雑であり、光ネットワークの費用を増大させてしまう。

【0020】

そこで、本発明は上記の課題を解決した、新規で有用な量子半導体装置およびその製造方法を提供することを概括的課題とする。

【0021】

本発明のより具体的な課題は、S-Kモード成長した量子ドットを有し、しかも偏波依存性の無い量子半導体装置を提供することにある。

【0022】

本発明の他の課題は、S-Kモード成長した量子ドットを有し、しかもTMモードの光に対して動作可能な量子半導体装置を提供することにある。

【0023】

【課題を解決するための手段】

本発明は上記の課題を、半導体基板と、前記半導体基板上に形成された、量子構造を含む活性層とよりなる量子光半導体装置において、前記量子構造は：第1の格子定数および第1のバンドギャップを有する第1の半導体結晶よりなる第1のバリア層と、前記第1のバリア層上にエピタキシャルに形成され、第2の格子定数および第2のバンドギャップを有する第2の半導体結晶よりなる第2のバリア層と、前記第2のバリア層中に形成され、前記第1の格子定数とは異なる格子定数および前記第1および第2のバンドギャップよりも小さなバンドギャップを有し、前記第1の半導体結晶および第2の半導体結晶に対して歪み系を形成する半導体結晶よりなり、各々前記第2のバリア層の厚さに実質的に等しい高さを有する複数の量子ドットと、前記第2のバリア層上に形成され、前記量子ドットを形成する半導体結晶の格子定数とは異なる格子定数を有し、また前記量子ドットを形成する半導体結晶のバンドギャップよりも大きな第3のバンドギャップを有する第3の半導体結晶よりなる第3のバリア層となり、前記第3のバリア層は、前記第2のバリア層中に形成された前記量子ドットの頂部に接することを特

徴とする量子光半導体装置により、解決する。

【0024】

本発明はまた上記の課題を、半導体基板と、前記半導体基板上に形成された、量子構造を含む活性層とよりなる量子光半導体装置において、前記量子構造は：第1の格子定数および第1のバンドギャップを有する第1の半導体結晶よりなる第1のバリア層と、前記第1のバリア層上にエピタキシャルに形成され、第2の格子定数および第2のバンドギャップを有する第2の半導体結晶よりなる第2のバリア層と、前記第2のバリア層中に形成され、前記第1の格子定数とは異なる格子定数および前記第1および第2のバンドギャップよりも小さなバンドギャップを有し、前記第1の半導体結晶および第2の半導体結晶に対して歪み系を形成する半導体結晶よりなり、各々前記第2のバリア層の厚さに実質的に等しい高さを有する複数の量子ドットとよりなり、前記第1のバリア層と前記第2のバリア層とは、前記第1のバリア層が前記第2のバリア層中の前記量子ドットの頂部に接するように繰り返し積層され、前記第1のバリア層と前記第2のバリア層とは、異なった組成を有することを特徴とする量子光半導体装置により、解決する。

【0025】

その際、本発明では前記量子構造が、TMモードの光放射に対する相互作用の割合が、TEモードの光放射に対する相互作用の割合と等しいか、より大きいことを特徴とする。

【0026】

本発明はまた、半導体基板と、前記半導体基板上に形成された、量子構造を含む活性層とよりなる量子光半導体装置において、前記量子構造は：第1の格子定数および第1のバンドギャップを有する第1の半導体結晶よりなるバリア層と、前記バリア層中に形成され、前記第1の格子定数とは異なる第2の格子定数および前記第1のバンドギャップよりも小さな第2のバンドギャップを有し、前記第1の半導体結晶に対して歪み系を形成する半導体結晶よりなる複数の量子ドットとよりなり、前記複数の量子ドットを含む前記バリア層は所定の積層数だけ積層され、前記積層数は、TMモードの光放射に対する相互作用の割合が、TEモードの光放射に対する相互作用の割合と等しいか、より大きくなるように設定され

ていることを特徴とする量子光半導体装置により、解決する。

【0027】

本発明によれば、量子ドットに印加される面内方向の歪みと面に垂直方向の歪みの大きさを最適化することができ、先の式（1）において、 $\epsilon_{zz} < \epsilon_{xx}$ の関係を実現することが可能になる。その結果、前記項 ΔE_{1-h} が負となり、従来のように重い正孔ではなく軽い正孔の準位が正孔の基底状態となり、かかる軽い正孔準位と電子準位との間で光励起が生じようになる。従って、このようにして歪みを最適化された量子ドットは、主としてTMモードの光放射に対して相互作用をするようになる。

【0028】

そこで、従来のTEモードの光放射に対して相互作用する量子ドットに加えてTMモードの光放射に相互作用する量子ドットを有する量子光半導体装置を形成することにより、あるいは個々の量子ドットにおいてTEモードとTMモードの光相互作用が同等の割合で生じるように歪みを最適化することにより、光ネットワークなどの使用に適した偏波依存性のない光半導体装置を実現することが可能になる。

【0029】

【発明の実施の形態】

[第1実施例]

図3は、本発明の第1実施例による量子光半導体装置10の構成を示す。

【0030】

図3を参照するに、（100）面方位を有するGaAs基板11上にGaAsバッファ層12を形成し、さらに前記GaAsバッファ層12上にInAs層を基板温度510°CでのMOVPE法により、約1.8分子層分の厚さのInAs層が形成されるような原料供給量で形成する。このようにして形成されたInAs層ではInAs結晶の格子定数がGaAs基板の格子定数よりも大きいため圧縮歪みを受け、その結果、前記GaAsバッファ層12上にはS-Kモード成長により、歪みエピタキシャル系を形成する島状のInAs量子ドット13が成長する。なお、このようなInAs量子ドット13はMBE法によっても同様に形

成することができる。

【0031】

さらにこのような構造上にGaNバリア層14をMOVPE法により約3分子層の厚さにエピタキシャルに形成し、前記量子ドット13をバリア層14により埋め込む。

【0032】

さらにこのようにして形成されたバリア層14上に次のInAs層をMOVPE法により、0.7分子層分の厚さのInAs層が形成されるような原料供給量で形成し、次のInAs量子ドット13を、同様なS-Kモード成長により形成する。

【0033】

さらに前記量子ドット13を埋め込むように次のバリア層14と次の量子ドット13とが繰り返し形成されて、量子構造が形成されている。

【0034】

図4 (A), (B) は、それぞれ図3の量子光半導体装置10について求めた基底状態のPLピークエネルギー、およびTEモードとTMモードの間のPL強度比TE/TMを、積層数の関数として示す。なお、図4 (B) 中には、基板面に対するPL光のTE偏波面とTM偏波面の関係が示してある。

【0035】

図4 (A) を参照するに、積層数が増すにつれてPLピークエネルギーは減少し、積層数が20層ないし30層を超えると約1.05eVの値に収斂するのがわかる。これは個々の量子ドットが量子力学的に結合し、全体として大きな量子ドットが形成されるためであると考えられる。

【0036】

一方図4 (B) を参照するに、PL強度のTE/TM比も積層数と共に減少し、特に積層数が約8の場合にTE/TM比が1となり、量子ドットの偏波依存性が消滅することがわかる。さらに積層数を増加させるとTMモードのPL強度がTEモードを上回り、特に積層数が15ないし20を超えるとTMモードが支配的になることがわかる。

【0037】

このように、本実施例によれば、図3に示す量子ドット13を含むバリア層14を繰り返し積層し、その際の積層数を最適化することにより、面内歪の値が、面に垂直な方向の歪の値に等しいか、より大きくなり($\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{xx} \leq 0$)、偏波無依存性の量子ドット、あるいはTMモードが支配的な量子ドットを有する量子構造を形成することが可能になる。

[第2実施例]

図5は、本発明の第2実施例による光量子半導体装置20の構成を示す。

【0038】

図5を参照するに、光量子半導体装置20は(100)面方位のGaAs基板21を有し、前記GaAs基板21上にはGaAsあるいはAlGaAsバッファ層22を介してMOVPE法を使ったS-K成長により、InAs量子ドット23が形成されている。また前記InAs量子ドット23がS-K成長する面には、非常に薄いInAsウェッティング層23aが形成されている。なお先の図3の実施例でもこのようなウェッティング層は形成されるが、簡単のため図示は省略している。

【0039】

前記InAs量子ドット23は、例えば510°Cの基板温度において気相原料をInAs層が1.9分子層成長するような供給量で供給することにより形成され、次に前記InAs量子ドット23を覆うように、組成が $In_xGa_{1-x}As$ で表されるInGaAsバリア層24を、エピタキシャルに形成する。

【0040】

さらに前記量子ドット23の成長とInGaAs層24の成長を繰り返すことにより、図5の量子光半導体装置20が形成される。

【0041】

図6は、図5の量子光半導体装置20について測定したPLスペクトルの例を示す。ただし図6中、試料Aは前記InGaAsバリア層24の代わりにGaAs層を使った場合を、また試料Bは前記InGaAsバリア層24としてIn組

成 x が 0.13 ($x = 0.13$) の InGaAs を使った場合を示す。また図中、s, p, d はそれぞれ s 裂、p 裂および d 裂、すなわち量子ドットの基底準位、第 1 励起準位および第 2 励起準位からの放射に対応している。

【0042】

図 6 を参照するに、試料 A では s, p, d のいずれにおいても TE モードの放射が TM モードよりも優勢であるのに対し、試料 B では TM モードがはるかに支配的になっているのがわかる。

【0043】

図 6 の試料 B の結果は、バリア層 24 として InGaAs 混晶を使った場合についてのものであるが、これは図 5 の構造においてバリア層 24 中、InAs 量子ドット 23 直上の領域 24A において歪みの蓄積の結果、In 濃度が増大し、格子定数が増大している効果を反映しているものと考えられる。またこの領域 24A における In 濃度の増大に伴って、前記バリア層 24 のうち、量子ドット 23 に側方から接する部分では Ga 濃度が増大し、格子定数が局所的に減少するものと考えられる。すなわち、図 6 の結果は、図 7 に示すような量子ドット 23 の周辺におけるバリア層 24 の局所的な組成変化に対応していると考えられる。ただし図 7 は、図 5 中のひとつの量子ドット 23 の周辺を概略的に示したものである。図 7 中、先に説明した部分には対応する参照符号を付し、説明を省略する。

【0044】

図 5 あるいは図 7 の領域 24A における組成変化は自己組織的に生じるものであり、パターニング等の外部プロセスを行う必要はない。

【0045】

なお、上記の例では前記バリア層 24 として InGaAs を使ったが、バリア層 24 として InGaAsP, InAlGaAs, InAlGaP 等の混晶を使うことも可能である。

[第 3 実施例]

図 8 は、本発明の第 3 実施例による量子光半導体装置 30 の構成を示す。

【0046】

図8を参照するに、(311)B面方位を有するInP基板31上には図示を省略したInPバッファ層を介してInGaAsPバリア層32が形成されており、前記InGaAsPバリア層32上には非ドープInGaAsあるいはInAsよりなる量子ドット33が450-550°Cの基板温度におけるMOVPE法を使ったS-K成長プロセスにより形成されている。かかるS-K成長の結果、前記InGaAsPバリア層32上には非常に薄いInGaAsウェッティング層33Aが形成されている。

【0047】

さらに前記量子ドット33は前記InGaAsPバリア層32とは異なる組成を有する別のInGaAsPバリア層34により埋め込まれ、前記量子ドット33を含むバリア層32およびバリア層34は交互に10周期ほど、繰り返し堆積される。その際、前記InGaAsPバリア層32および34はMOVPE法により、550-650°Cの基板温度で形成される。

【0048】

図8の構造では、バリア層32がその下の量子ドット33の頂部に接している。

【0049】

図9は、図8の構造において量子ドット33をInAsにより形成し、バリア層32の組成をInP基板に格子整合する $In_{0.717}Ga_{0.283}As_{0.611}P_{0.389}$ に設定し、さらに組成 $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ で表したバリア層34の組成を、 $0.15 \leq x \leq 0.92$ および $0.5 \leq y \leq 1$ の範囲で変化させた場合の、量子ドット33中における基底状態からの遷移エネルギー E_g （図2を参照）を計算した結果を示す。ただしAs組成yは、In組成xに対応して、InGaAsPバリア層34のバンドギャップが量子ドットのバンドギャップよりも大きいという維持するように変化させた。また図9の計算では、InAs量子ドット33は $35\text{nm} \times 35\text{nm} \times 10\text{nm}$ の直方体であると仮定している。この構造では、前記量子ドット33に生じる歪成分 ϵ_{xx} および ϵ_{yy} は-0.0067となる（ $\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = -0.0067$ ）。このように歪成分 ϵ_{xx} 、 ϵ_{yy} は負の値を有しており、従って量子ドット33には圧縮歪が生じている。

【0050】

図9中、2点鎖線は(001)面上にS-Kモードで形成した量子ドットにおいて重い正孔が伝導帯に励起されるのに要するエネルギー $E g_{hh}(001)$ を、実線は(111)面上にS-Kモードで形成した量子ドットにおいて重い正孔が伝導帯に励起されるのに要するエネルギー $E g_{hh}(111)$ を、1点鎖線は(001)面上にS-Kモードで形成した量子ドットにおいて軽い正孔が伝導帯に励起されるのに要するエネルギー $E g_{1h}(001)$ を、点線は(111)面上にS-Kモードで形成した量子ドットにおいて軽い正孔が伝導帯に励起されるのに要するエネルギー $E g_{1h}(111)$ を、それぞれ表している。

【0051】

図9を参照するに、重い正孔および軽い正孔のいずれにおいても結晶面方位は励起エネルギー $E g$ にほとんど影響せず、むしろInGaAsバリア層34中のIn組成 x が励起エネルギーに支配的な影響を与えることがわかる。しかも特にIn組成 x が約0.63の値を有する場合に重い正孔と軽い正孔との間のエネルギー差 ΔE_{1-h} がゼロとなり、量子ドット33の偏波依存性が消失することがわかる。すなわち、この組成において、基板面に垂直方向に作用する歪成分 ε_{zz} の大きさが前記歪成分 ε_{xx} あるいは ε_{yy} に等しくなる。

【0052】

さらに前記In組成 x を0.63未満に設定することにより前記エネルギー差 ΔE_{1-h} の符号が逆転し、量子ドット33において軽い正孔準位が基底状態となる。従って、このような量子ドット33を使うことにより、TMモードの放射光と相互作用する量子半導体装置を構成することが可能になる。

【0053】

なお、図8の実施例においても、前記バリア層32および34のうち、量子ドット33に接する部分において先の図7と同様な組成の局所的な変化が生じているものと考えられる。

[第4実施例]

図10は、本発明の第4実施例によるリッジ導波型光半導体装置40の構成を

示す。

【0054】

図10を参照するに、光半導体装置40は(311)B面方位を有するn型InP基板41上に構成されており、前記n型InP基板41上にはn型InPバッファ層42を介してn型InPクラッド層43がエピタキシャルに形成されている。前記InP基板41、InPバッファ層42およびInPクラッド層43は、例えば $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のキャリア密度を有するようにドープされている。

【0055】

前記クラッド層43上には、先に図8の実施例で説明したInGaAsPバリア層32および34よりなりバリア層34中に量子ドット33を含む活性層44が繰り返し積層されており、その際バリア層32の組成をIn_{0.717}Ga_{0.283}As_{0.611}P_{0.389}に、またバリア層34の組成をIn_{0.63}Ga_{0.37}As_{0.5}P_{0.5}に設定する。

【0056】

さらにこのようにして形成された活性層44上にp型InPよりなる上側クラッド層45が形成され、さらに前記クラッド層45上にはp型InPよりなるコンタクト層を46を介して上部電極47が形成され、また前記InP基板41の下面には下部電極48が形成される。

【0057】

図10のリッジ導波型光半導体装置では、前記上部クラッド層45およびコンタクト層46はパターニングされて素子40の軸方向に延在するリッジ構造を形成し、さらに前記リッジ構造を両側から支持するように低屈折率を有するSiO₂やポリイミドなどの絶縁膜49A、49Bを形成する。その結果、前記活性層44中に形成された光放射はかかるリッジ構造に沿って導波され、活性層44中において誘導放出が生じる。そこで前記活性層44の両端面にミラーを形成することにより、前記素子40はレーザダイオードとして作用する。またこのようなミラーを形成しないことにより、前記素子40により光増幅器を構成することができる。

【0058】

このような光半導体装置40は、前記バリア層32および34の組成を先に説明したように設定することにより、偏波無依存性の動作を実現することができる。また前記バリア層32中のIn組成を0.63未満に設定することにより、TMモードのレーザ発振あるいは光增幅を行うことが可能になる。また、かかる光半導体素子を使って光スイッチなど、光ネットワークで使われる様々な光能動素子を形成することが可能である。

【0059】

さらに本実施例において基板41として前記n型InP基板の代わりにn型GaN基板を使った場合、前記活性層44として先に図3で説明したInAs量子ドット13とGaNバリア層14とを積層した構造、あるいは図5で説明したInAs量子ドット23とInGaAsバリア層24とを積層した構造を使うことも可能である。

[第5実施例]

図11は、本発明の第5実施例による光半導体装置50の構成を示す。ただし図中、先に説明した部分には同一の参照符号を付し、説明を省略する。

【0060】

図11を参照するに、本実施例では光半導体装置50は先の実施例による光半導体装置40と同様な積層構造を有するが、前記上部クラッド層45の一部および活性層44中に下部クラッド層43にまで達するメサ構造が形成されており、前記メサ構造に両側にはp型InP層51およびn型InP層52を積層した電流阻止領域53Aおよび53Bが形成されている。

【0061】

かかる構成によっても、高効率で動作し、しかも偏波依存性のないレーザダイオードあるいは光増幅器を構成することができる。また、かかる光半導体素子を使って光スイッチなど、光ネットワークで使われる様々な光能動素子を形成することが可能である。

[第6実施例]

図12は、図10あるいは図11の光能動素子を使って構築したフォトニックネットワーク60の例を示す。

【0062】

図12を参照するに、フォトニックネットワーク60は光ファイバ61で結合された多数のノード62より構成されている。

【0063】

図12の例ではノード62Aは波長が $\lambda_1, \lambda_2, \dots$ の光信号を一括して増幅できる多波長一括光増幅器71を有しているが、図10あるいは11の光能動素子40あるいは50を使うことにより、偏波依存性のない光増幅動作を実現することができる。

【0064】

また図12の例ではノード62Bが波長が $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ の入力を波長が $\lambda_i, \lambda_j, \dots$ の出力光に変換する波長スイッチ素子を有しているが、先の光能動素子40あるいは50を使うことにより、偏波依存性のない波長スイッチ素子を実現することが可能になる。

【0065】

以上、本発明を好ましい実施例について説明したが、本発明はかかる特定の実施例に限定されるものではなく、特許請求の範囲に記載した要旨内において、様々な変形・変更が可能である。

【0066】

(付記1) 半導体基板と、前記半導体基板上に形成された、量子構造を含む活性層とよりなる量子光半導体装置において、

前記量子構造は：

第1の格子定数および第1のバンドギャップを有する第1の半導体結晶よりなる第1のバリア層と、

前記第1のバリア層上にエピタキシャルに形成され、第2の格子定数および第2のバンドギャップを有する第2の半導体結晶よりなる第2のバリア層と、

前記第2のバリア層中に形成され、前記第1の格子定数とは異なる格子定数および前記第1および第2のバンドギャップよりも小さなバンドギャップを有し、

前記第1の半導体結晶および第2の半導体結晶に対して歪み系を形成する半導体結晶よりなり、各々前記第2のバリア層の厚さに実質的に等しい高さを有する複数の量子ドットと、

前記第2のバリア層上に形成され、前記量子ドットを形成する半導体結晶の格子定数とは異なる格子定数を有し、また前記量子ドットを形成する半導体結晶のバンドギャップよりも大きな第3のバンドギャップを有する第3の半導体結晶よりなる第3のバリア層とよりなり、

前記第3のバリア層は、前記第2のバリア層中に形成された前記量子ドットの頂部に接することを特徴とする量子光半導体装置。

【0067】

(付記2) 前記第2および第3のバリア層は、連続した单一の半導体層を形成することを特徴とする請求項1記載の量子光半導体装置。

【0068】

(付記3) 前記第1のバリア層は、前記量子ドット近傍の領域において変化した組成を有し、前記第3のバリア層は、前記量子ドット近傍の領域において変化した組成を有することを特徴とする付記1または2記載の量子光半導体装置。

【0069】

(付記4) 前記第1～第3のバリア層はInおよびGaを含むII-V族化合物半導体混晶であり、前記第1および第3のバリア層では、前記量子ドット近傍の領域においてIn濃度が増大していることを特徴とする付記3記載の量子光半導体装置。

【0070】

(付記5) 前記第2のバリア層は、前記量子ドット近傍の領域においてGa濃度が増大していることを特徴とする付記4記載の量子半導体装置。

【0071】

(付記6) 前記第1の半導体結晶、前記第2の半導体結晶および前記第3の半導体結晶は、前記半導体基板に対して格子整合するものであることを特徴とする付記1～5のうち、いずれか一項記載の量子光半導体装置。

【0072】

(付記7) 前記第1および第3の半導体結晶は、同一組成を有することを特徴とする付記1～6のうち、いずれか一項記載の量子光半導体装置。

【0073】

(付記8) 前記第2の格子定数は、前記第1および第3の格子定数よりも大きいことを特徴とする付記1～7のうち、いずれか一項記載の量子光半導体装置。

【0074】

(付記9) 前記第1～第3の半導体結晶の各々は、InGaAsP混晶、InAlGaAs混晶、InAlGaP混晶のいずれかより選ばれることを特徴とする付記1～8のうち、いずれか一項記載の量子光半導体装置。

【0075】

(付記10) 半導体基板と、前記半導体基板上に形成された、量子構造を含む活性層とよりなる量子光半導体装置において、

前記量子構造は：

第1の格子定数および第1のバンドギャップを有する第1の半導体結晶よりなる第1のバリア層と、

前記第1のバリア層上にエピタキシャルに形成され、第2の格子定数および第2のバンドギャップを有する第2の半導体結晶よりなる第2のバリア層と、

前記第2のバリア層中に形成され、前記第1の格子定数とは異なる格子定数および前記第1および第2のバンドギャップよりも小さなバンドギャップを有し、前記第1の半導体結晶および第2の半導体結晶に対して歪み系を形成する半導体結晶よりなり、各々前記第2のバリア層の厚さに実質的に等しい高さを有する複数の量子ドットとよりなり、

前記第1のバリア層と前記第2のバリア層とは、前記第1のバリア層が前記第2のバリア層中の前記量子ドットの頂部に接するように繰り返し積層され、

前記第1のバリア層と前記第2のバリア層とは、異なった組成を有することを特徴とする量子光半導体装置。

【0076】

(付記11) 前記量子ドットはInAsよりなり、前記第1および第2のバ

リア層は、いずれもInGaAsP混晶よりなることを特徴とする付記10記載の量子光半導体装置。

【0077】

(付記12) 前記第1のバリア層は、組成パラメータxおよびyを使って $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ で表される組成を有し、組成パラメータxが0.65以下に設定されることを特徴とする付記11記載の量子光半導体装置。

【0078】

(付記13) 前記量子構造は、TMモードの光放射に対する相互作用の割合が、TEモードの光放射に対する相互作用の割合と等しいか、より大きいことを特徴とする付記1~12のうち、いずれか一項記載の量子光半導体装置。

【0079】

(付記14) 半導体基板と、前記半導体基板上に形成された、量子構造を含む活性層とよりなる量子光半導体装置において、

前記量子構造は：

第1の格子定数および第1のバンドギャップを有する第1の半導体結晶よりなるバリア層と、

前記バリア層中に形成され、前記第1の格子定数とは異なる第2の格子定数および前記第1のバンドギャップよりも小さな第2のバンドギャップを有し、前記第1の半導体結晶に対して歪み系を形成する半導体結晶よりなる複数の量子ドットとよりなり、

前記複数の量子ドットを含む前記バリア層は所定の積層数だけ積層され、

前記積層数は、TMモードの光放射に対する相互作用の割合が、TEモードの光放射に対する相互作用の割合と等しいか、より大きくなるように設定されていることを特徴とする量子光半導体装置。

【0080】

(付記15) 前記バリア層は、前記量子ドットの高さを超える厚さを有することを特徴とする付記14記載の量子光半導体装置。

【0081】

(付記16) 前記半導体基板およびバリア層はGaAsよりなり、前記量子

ドットはInAsよりなり、前記所定の積層数は約8層であることを特徴とする付記14または15記載の量子光半導体装置。

【0082】

(付記17) 前記量子ドットでは、面内歪の値が、引張り歪みを正、圧縮歪みを負に定義した場合、面に垂直な方向の歪の値に等しいか、より大きいことを特徴とする付記1~16のうち、いずれか一項記載の量子光半導体装置。

【0083】

(付記18) 前記半導体基板はInPまたはGaAsよりなることを特徴とする付記1~17のうち、いずれか一項記載の量子光半導体装置。

【0084】

(付記20) 前記半導体基板には第1の電極が設けられ、前記半導体基板と前記活性層との間には第1のクラッド層が設けられ、前記活性層上には、第2のクラッド層を介して第2の電極が設けられていることを特徴とする付記1~18のうち、いずれか一項記載の量子光半導体装置。

【0085】

【発明の効果】

本発明によれば、量子ドットを囲むバリア層の組成を選択することにより、量子ドットに生じる歪を制御することが可能になる。その結果、価電子帯を形成する重い正孔の準位と軽い正孔の準位との関係が伝導帯に対して変化し、TMモードの光放射に対する量子ドットの相互作用の割合をTEモードの光放射に対する量子ドットの相互作用の割合に対して同等、あるいはそれ以上に設定することが可能である。その結果、歪ヘテロエピタキシャル構造を使った、一般に不均一な歪を特徴とする量子ドットを有する量子光半導体装置において、偏波無依存動作を実現することが可能になる。

【図面の簡単な説明】

【図1】

従来のS-K成長プロセスにより形成された量子ドットを有する量子半導体装置の構成を示す図である。

【図2】

従来のS-K成長プロセスにより形成された量子ドットの概略的なエネルギーバンド構造を示す図である。

【図3】

本発明の第1実施例による量子半導体装置の構成を示す図である。

【図4】

(A), (B) は、図3の量子半導体装置におけるPLエネルギーおよびTE/TMモード比を示す図である。

【図5】

本発明の第2実施例による量子半導体装置の構成を示す図である。

【図6】

図5の量子半導体装置のPLスペクトルを示す図である。

【図7】

図5の量子半導体装置中において出現する構造を概略的に示す図である。

【図8】

本発明の第3実施例による量子半導体装置の構成を示す図である。

【図9】

図8の構造における量子ドットの波長とバリア層組成との関係を示す図である

【図10】

本発明の第4実施例による光半導体装置の構成を示す図である。

【図11】

本発明の第5実施例による光半導体装置の構成を示す図である。

【図12】

本発明の第6実施例によるフォトニックネットワークの例を示す図である。

【符号の説明】

1, 11, 21, 31 基板

2, 12, 22, 32 バッファ層

3 量子構造

3a, 14, 24, 34 バリア層

3 b, 13, 23, 33 量子ドット

10, 20, 30 量子光半導体装置

24A 組成変化領域

33A ウェッティング層

40, 50 光半導体装置

41 基板

42 バッファ層

43 下部クラッド層

44 活性層

45 上部クラッド層

46 コンタクト層

47 上部電極

48 下部電極

49A, 49B 絶縁層

51 n型InP領域

52 p型InP領域

53A, 53B 電流狭窄領域

60 フォトニックネットワーク

61 光ファイバ

62, 62A, 62B ノード

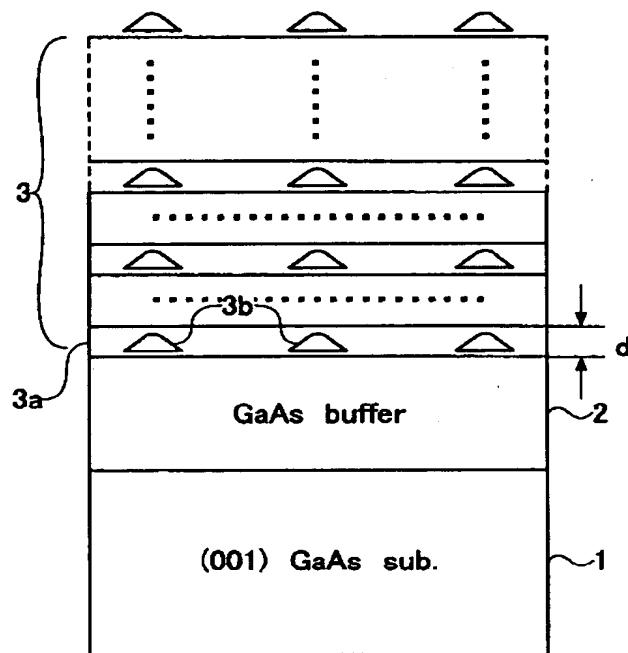
71 多波長光増幅器

72 波長スイッチ

【書類名】 図面

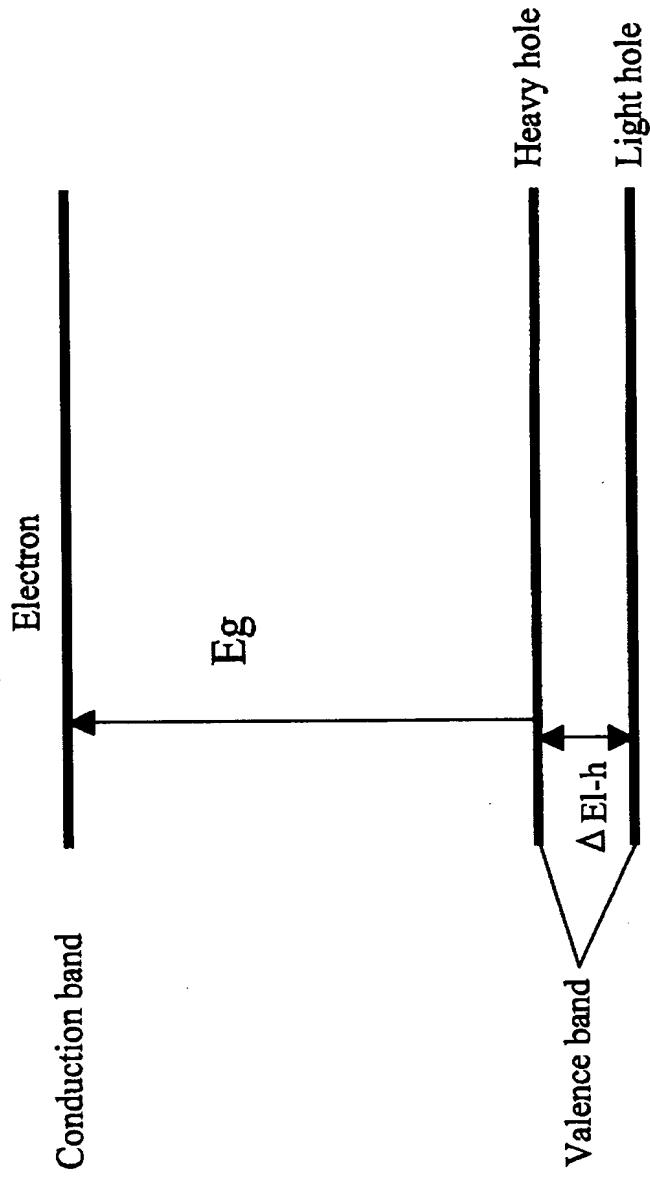
【図1】

従来のS-K成長プロセスにより形成された量子ドットを有する
量子半導体装置の構成を示す図



【図2】

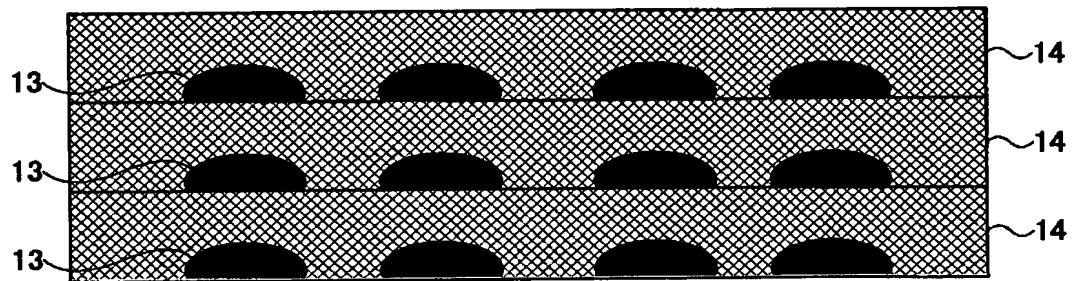
従来のS-K成長プロセスにより形成された量子ドットの
概略的なエネルギー構造を示す図



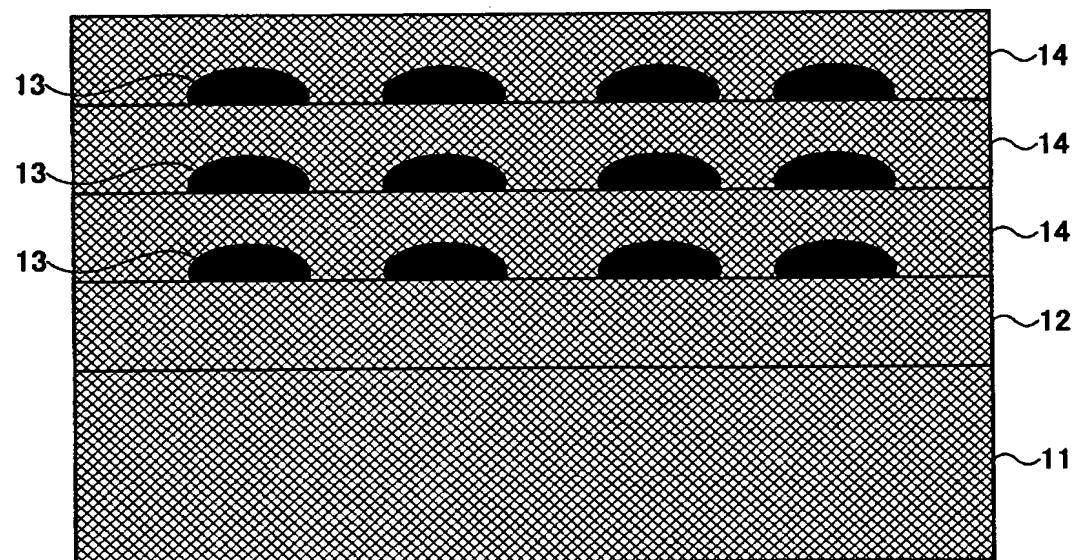
【図3】

本発明の第1実施例による量子半導体装置の構成を示す図

10

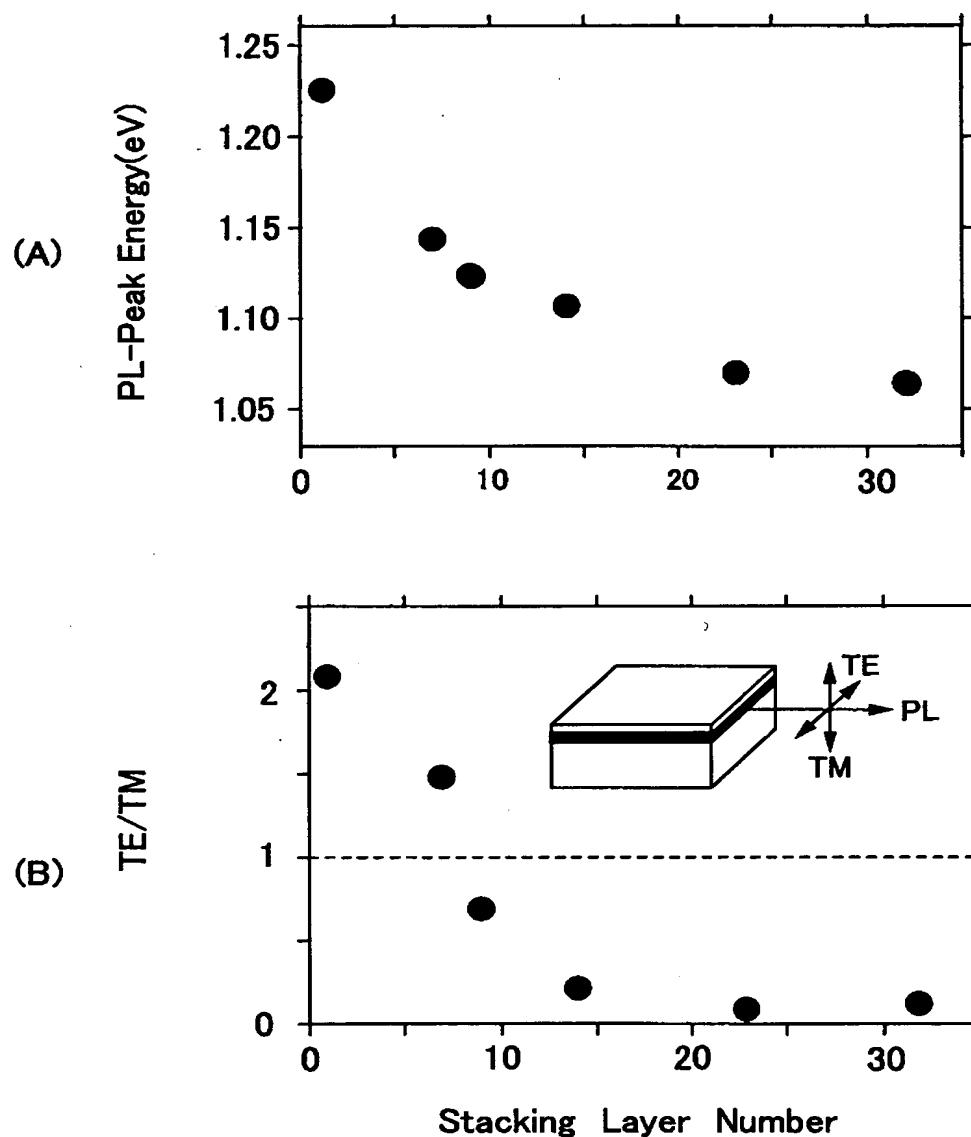


■ ■ ■ ■



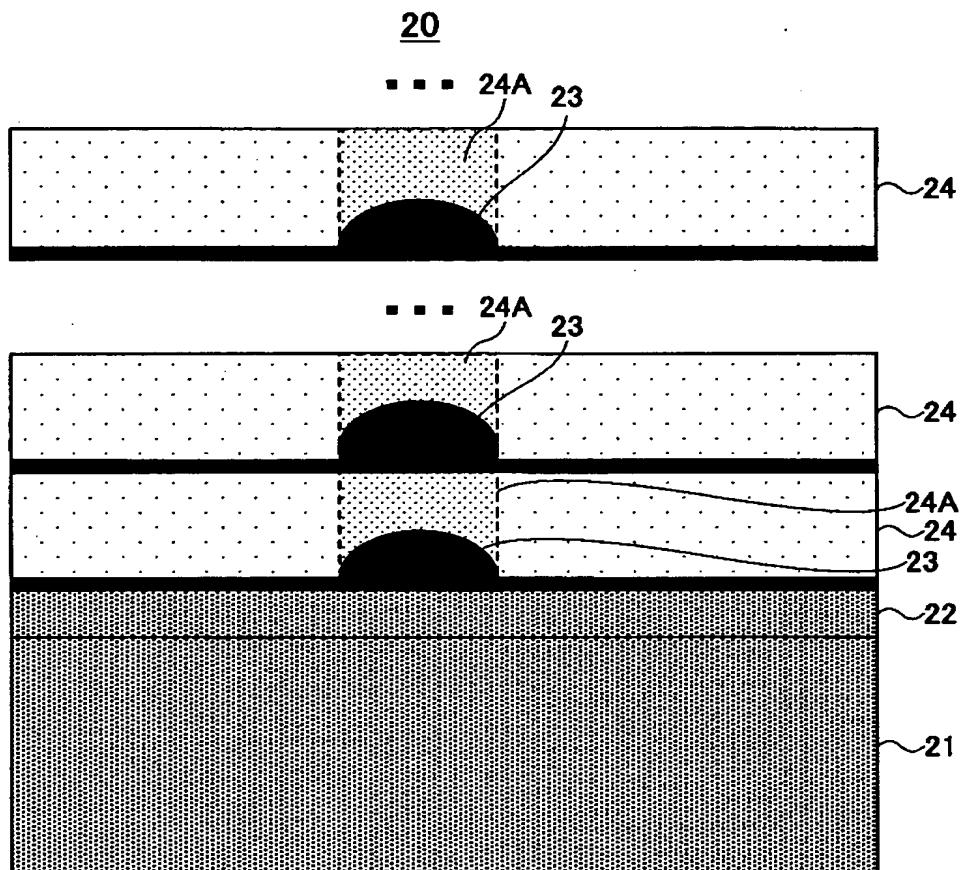
【図4】

(A), (B)は、図3の量子半導体装置におけるPLエネルギーおよびTE/TMモード比を示す図



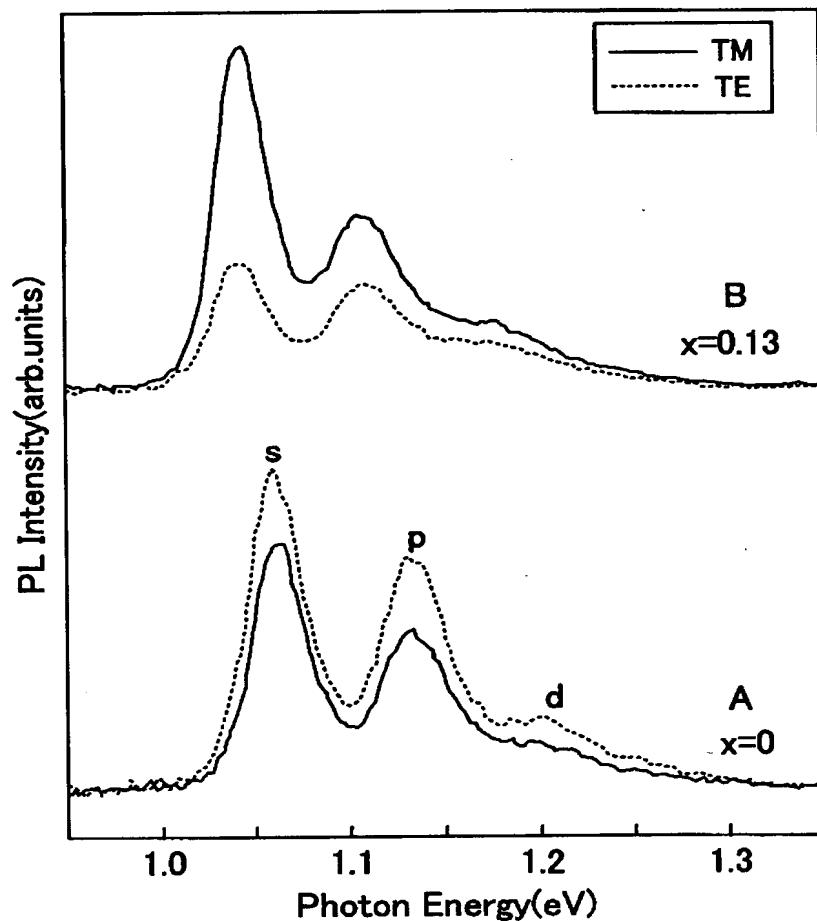
【図5】

本発明の第2実施例による量子半導体装置の構成を示す図



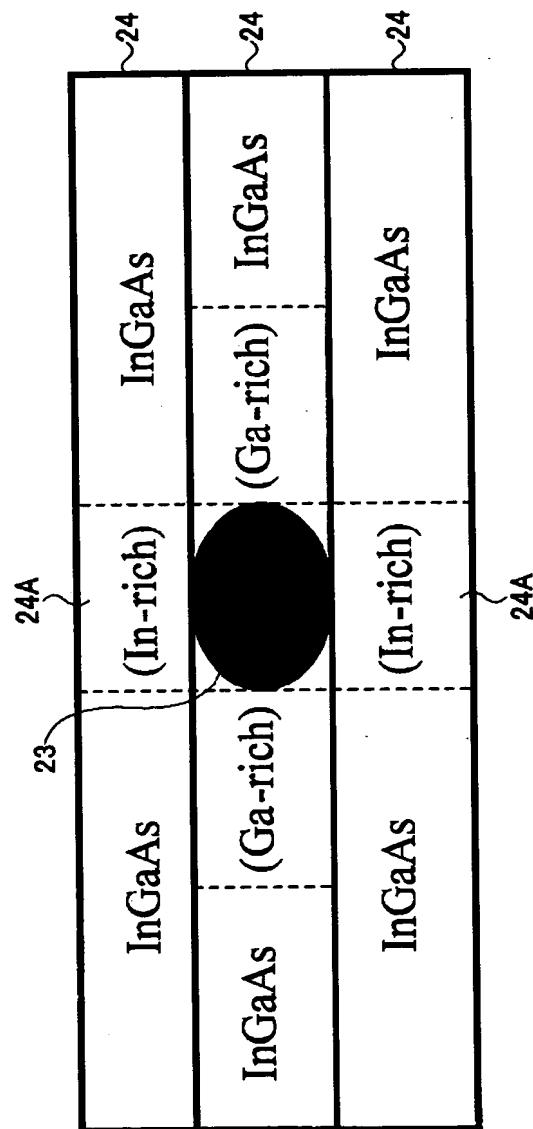
【図6】

図5の量子半導体装置中のPLスペクトルを示す図



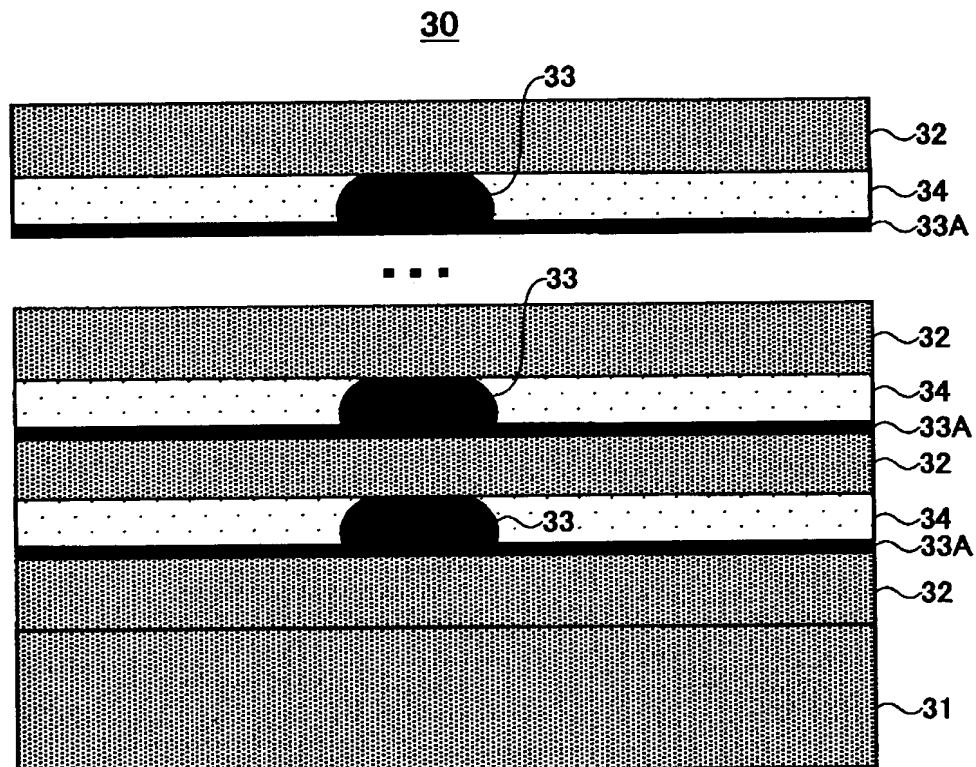
【図7】

図5の量子半導体装置中において出現する構造を概略的に示す図



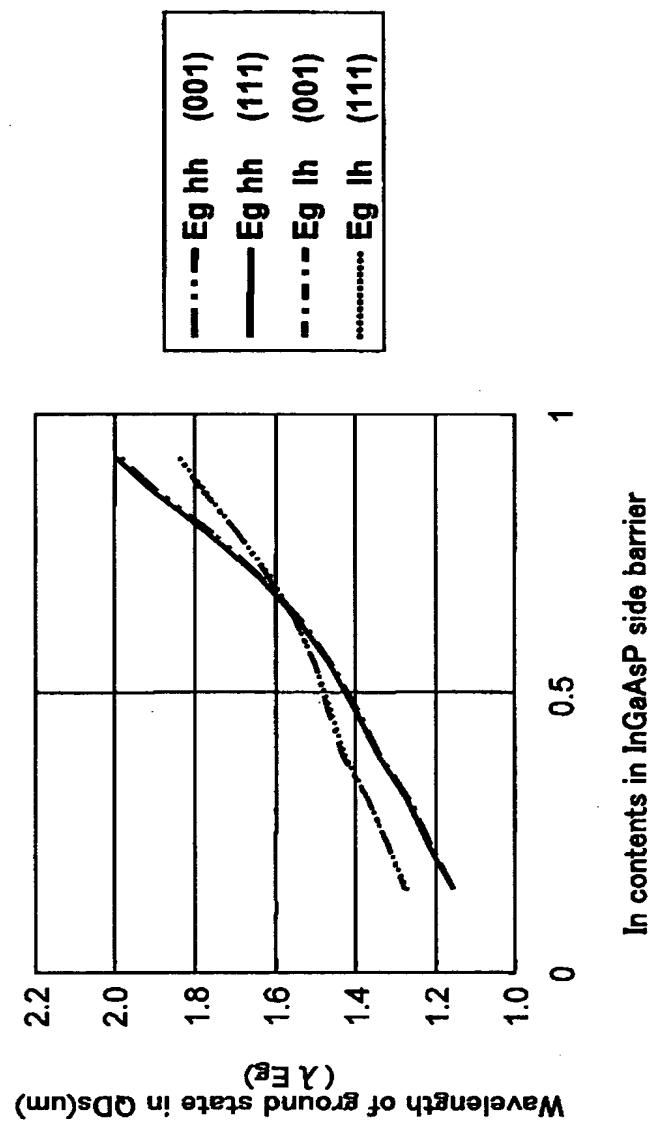
【図8】

本発明の第3実施例による量子半導体装置の構成を示す図



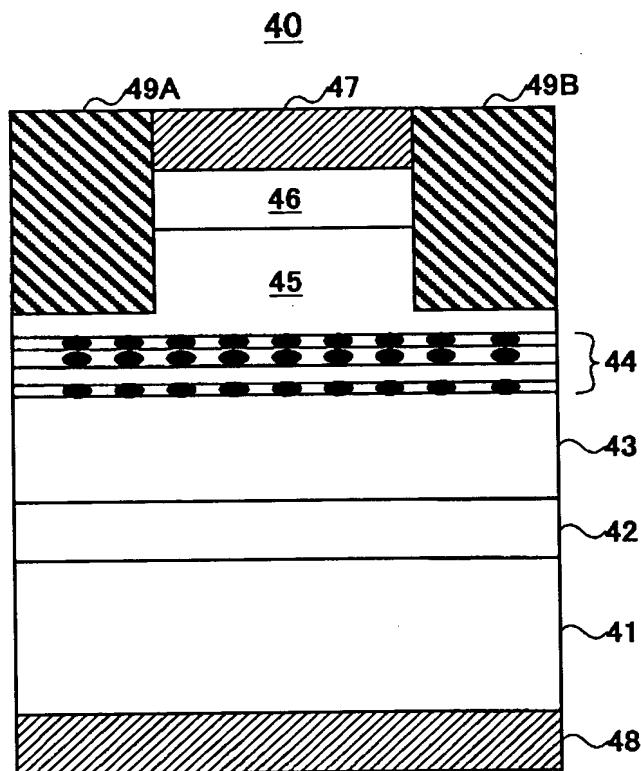
【図9】

図8の構造における量子ドットの波長とバリア層組成との
関係を示す図



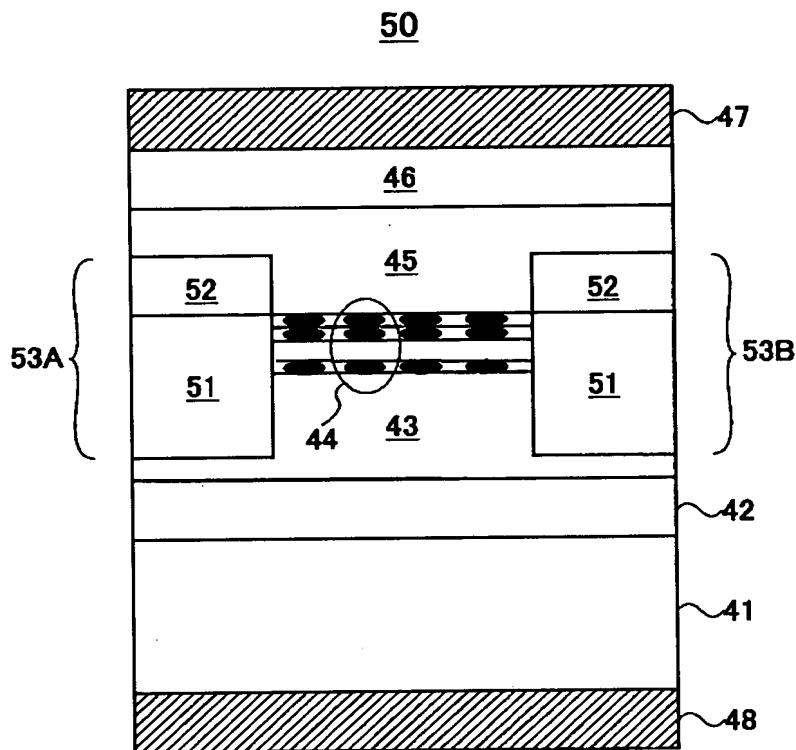
【図10】

本発明の第4実施例による光半導体装置の構成を示す図



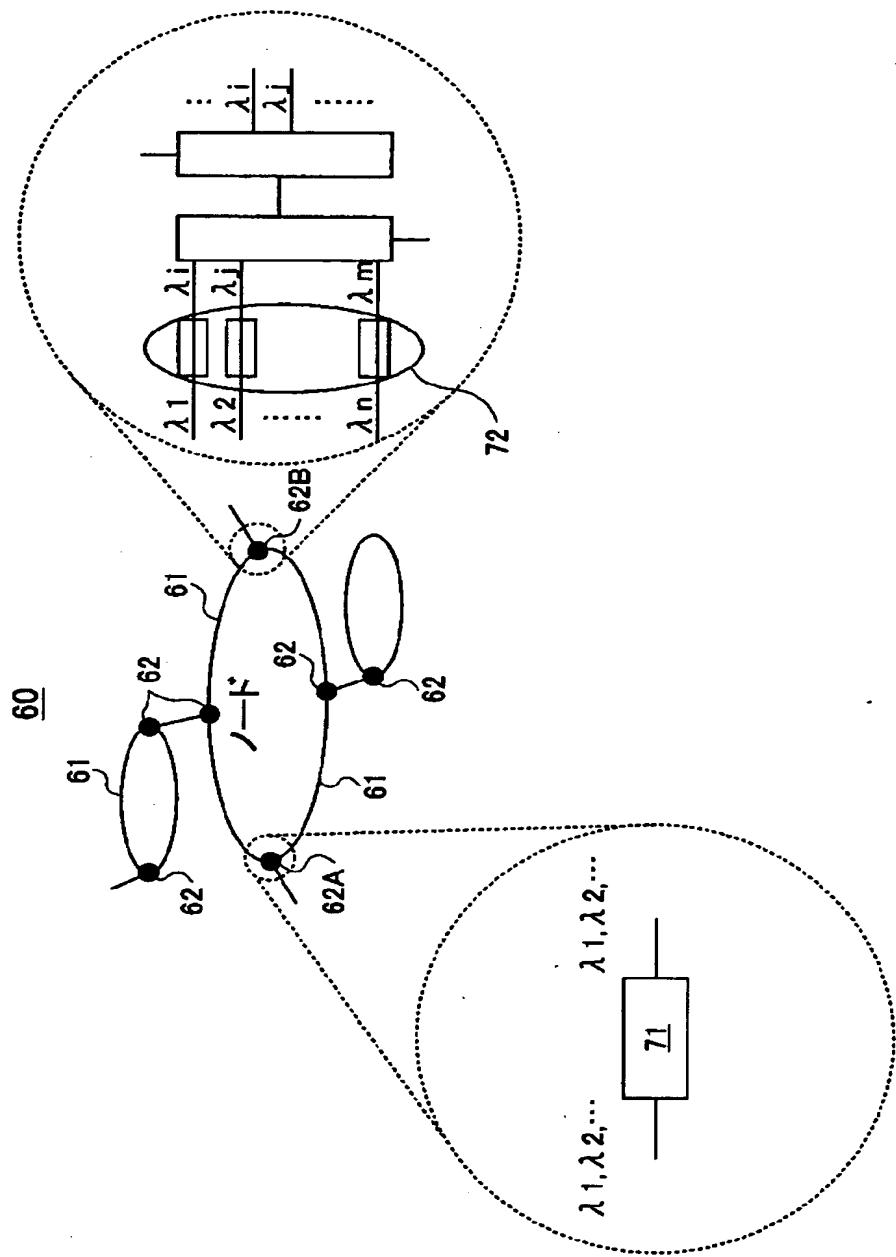
【図11】

本発明の第5実施例に光半導体装置の構成を示す図



【図12】

本発明の第6実施例によるフォトニックネットワークの例を示す図



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 歪ヘテロエピタキシャル系におけるS-Kモード成長により形成された量子ドットを有する量子光半導体装置において、偏波依存性を除去する。

【解決手段】 量子ドットを囲むバリア層の組成を変化させることにより、量子ドットに蓄積される歪の面内成分および基板面に垂直に働く成分の値を最適化し、価電子帯中の軽い正孔の準位と重い正孔の準位との関係を変化させる。

【選択図】 図7

出願人履歴情報

識別番号 [000005223]

1. 変更年月日 1996年 3月26日

[変更理由] 住所変更

住 所 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号
氏 名 富士通株式会社